冬小麦田植保无人飞机喷施除草剂雾滴粒径及沉积飘移分布特性评估

王国宾[1,2]，韩 鑫[1,2]，宋灿灿[1,2]，伊丽丽[1,2]，鲁文霞[1,2]，兰玉彬[1,2,3*]

（1. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院，山东淄博 255049；2. 山东省农业航空智能装备工程技术研究中心，山东淄博 255049；3. 华南农业大学 电子工程学院/人工智能学院，广东广州 510642）

摘 要：随着植保无人飞机作业面积的增加，雾滴飘移风险也日益凸显，尤其以除草剂飘移风险危害最高。为明确除草剂溶液对雾滴粒径的影响及植保无人飞机喷施除草剂雾滴沉积飘移分布特性，本研究通过室内雾化室测定了植保无人飞机安装的离心转盘雾化喷头喷洒清水及常用的15种麦田除草剂溶液的雾滴粒径分布，并通过田间试验在药箱中添加荧光示踪剂（60 g/hm^2）测定喷施作业区和飘移区的雾滴沉积量分布。室内测定结果表明，与清水相比，除草剂溶液对雾滴粒径影响显著。除唑草酮水分散粒剂外，其余溶液经离心转盘雾化喷头喷洒后，雾滴体积中径较清水均有所降低，且最大降低22.0%；小雾滴（V<150 μm）比例均有所增加，最大增加50.8%。田间飘移试验表明，植保无人飞机喷洒150 μm雾滴，在环境侧风风速为3.76 m/s时，作业区的雾滴沉积覆盖度和雾滴沉积密度仅为风速0.74 m/s时的41.3%和42.2%，且均匀性显著降低。在飘移区下风向12 m位置，雾滴沉积量为作业区的10%以下；下风向50 m处，雾滴沉积量低于检测限（0.0002 μL/cm^2）。飘移比率随风速的增加而增加，当风速达到3.76 m/s时，雾滴飘移比率达到46.4%。不同侧风风速下，90%的累积飘移位置在4.8～22.4 m。对飘移区沉积量与飘移距离、侧风风速拟合，结果表明下风向沉积量与风速呈正比。本研究为植保无人飞机冬麦田不同风速作业下的雾滴飘移距离提供数据支持，为喷雾飘移缓冲带、飘移风险评估提供依据。

关键词：植保无人飞机；小麦；除草剂剂型；雾滴粒径；侧风风速；雾滴沉积飘移量

中图分类号：S224.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202107-SA005

引用格式：王国宾, 韩鑫, 宋灿灿, 伊丽丽, 鲁文霞, 兰玉彬. 冬小麦田植保无人飞机喷施除草剂雾滴粒径及沉积飘移分布特性评估[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3): 38-51.

WANG Guobin, HAN Xin, SONG Cancan, YI Lili, LU Wenxia, LAN Yubin. Evaluation of droplet size and drift distribution of herbicide sprayed by plant protection unmanned aerial vehicle in winter wheat field[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 38-51. (in Chinese with English abstract)

1 引 言

自2015年农业部制定了《到2020年农药使用量零增长行动方案》以来，在精准化施药技术的推动下，中国三大主粮作物农药利用率逐年提高；截止到2020年，中国农药利用率达到了

收稿日期：2021-07-11 修订日期：2021-08-20

基金项目：山东省引进顶尖人才"一事一议"专项经费资助项目（鲁政办字［2018］27号）；淄博市重点研发计划（校城融合类）生态无人农场研究院项目（2019ZBXC200）；国家重点研发计划（2016YFD0200700）

作者简介：王国宾（1991—），男，博士，讲师，研究方向为精准农业航空施药技术。E-mail：guobinwang@sdut.edu.cn。

*通讯作者：兰玉彬（1961—），男，博士，教授，法国欧洲科学、艺术与人文学院院士，研究方向为精准农业航空应用技术。电话：0533-2782718。E-mail：ylan@sdut.edu.cn。

40.6%，比2015年增加4个百分点[1]。在这5年里，作为精准化施药装备之一的植保无人飞机[2]以其作业灵活度高、应急防控能力强、作业效率高[3]、农药利用率高等优点得到了广泛、快速发展，为促进中国农药利用率的提升发挥了重要作用[4,5]。截止到2019年，中国植保无人飞机保有量突破了5.0万架，作业面积超过4.5亿亩次，5年内增长了108倍[6]。目前，植保无人飞机已经成为中国植物病虫草害防控不可缺少的有力手段，极大改善了中国植保机械落后的局面，提升了中国施药技术水平。

为促进植保无人飞机的快速发展，研究者在植保无人飞机施药技术方面开展了大量研究。在喷洒设备优化方面，研发了超低容量旋流喷嘴[7]、转盘雾化喷嘴[8]、静电喷嘴[9]等多种适用于植保无人飞机的低容量喷施雾化喷嘴，并对喷嘴喷雾性能、雾化质量进行了系统的评估[10]，基本满足了当前植保无人飞机低容量喷施需求。在作业参数优化方面，针对水稻[11]、小麦[12]、玉米[13]、果树[14,15]等多种作物以沉积率和沉积变异系数作为评估指标，分析雾滴沉积与作物冠层互作关系，优化作业高度和作业速度，并选定了适合植保无人飞机作业的有效喷幅[16,17]，提高了施药质量。在田间药效评估方面，针对药剂、喷液量、雾滴粒径等参数开展了多种大田粮食作物病虫草害防治[18-20]和棉花脱叶效果[21,22]研究，针对不同的防治对象制定了最优喷洒参数，保障了植保无人飞机喷施良好的防治效果。2018年，国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心与美国富美实公司合作完成了“植保无人飞机施药操作规范”[23]，公开发布了筛选出的最佳植保产品和喷雾助剂、施药的关键技术参数和适宜的环境变量等，对植保无人飞机喷施作业起到了重要的参考作用。

随着作业面积的不断增大，植保无人飞机在喷施过程中的雾滴飘移风险问题也日益凸显。2018年，黑龙江省哈尔滨市玉米田植保无人飞机喷洒除草剂造成邻近大豆田严重药害[24]。2019年，新疆自治区小麦田植保无人飞机喷施“2甲・氯・双氟”和“炔草酯”等除草剂造成邻近十字花科作物严重药害[25]。作者在与各地飞防组织交流中发现，此类药害及环境安全事故时有发生。研究者过去对植保无人飞机喷施过程可能产生飘移的影响因素进行了分类研究，针对旋翼风场与下洗气流，采用流体力学软件对单旋翼[26]、四旋翼[27]无人机下的旋翼风场进行模拟，揭示了翼尖涡流及螺旋尾涡对雾滴飘移的影响，并以此结果优化喷嘴布置位置于旋翼正下方，以避免翼尖涡流的扰动影响。针对环境参数与作业参数，研究者分别在山东[28]、新疆[29]、海南[30]、江苏[31]等具有不同环境特征的区域开展多型号植保无人飞机雾滴飘移分布测定，发现无人机型号、环境参数、作业参数对雾滴飘移距离具有显著影响。针对喷雾助剂与喷嘴选择，研究者测定喷雾助剂类型及浓度对喷嘴雾化效果及雾滴飘移的影响，筛选了适宜植保无人飞机喷洒添加的喷雾助剂[32]及抗飘移气吸型扇形喷嘴[33]。尽管研究者过去对植保无人飞机喷施雾滴飘移各因素的影响进行了初步探索，并根据研究结果优化植保无人飞机机型和喷洒系统安装位置且表征不同环境参数和飞行参数对雾滴飘移影响权重，但尚缺少针对特定的施药药剂及对应施药环境下的雾滴飘移特征研究，尤其是除草剂喷施时期对应环境下的雾滴飘移分布测定。

根据全国农业技术推广服务中心发布的《2021年农田杂草科学防控技术方案》，中国的麦田可分为黄河流域旱旱轮作冬麦区、江淮流域水旱轮作冬麦区和春小麦种植区。其中黄河流域旱旱轮作麦区主要包括河北、山东、河南等地，此区域冬麦除草时周边作物较少，飘移药害风险较低；江淮流域水旱轮作麦区主要包括江苏、安徽、湖北、湖南等地，此区域冬麦除草时周边常种植油菜、蚕豆，飘移药害风险较高；西北春麦田主要包括新疆、甘肃等地，此区域春麦除草时周边常种植有棉花、向日葵、玉米、辣椒、打瓜、番茄等阔叶作物，同样具有较高的飘移药害

风险。为此，本研究针对植保无人飞机冬麦田除草剂喷施飘移高风险的施药场景，通过室内测定高浓度麦田除草剂对离心转盘雾化喷嘴喷施雾滴粒径的影响，并通过田间测定植保无人飞机喷施后雾滴在作业区和飘移区的沉积飘移量分布，确定植保无人飞机喷施飘移比率和90%累积飘移位置，拟合雾滴飘移分布曲线，以期为植保无人飞机麦田除草药剂喷施雾滴飘移评估提供参考。

2 材料与方法

2.1 雾滴粒径测定

雾滴粒径是影响雾滴飘移的重要因素之一。本试验首先在室内测定植保无人飞机喷施所需的高浓度除草剂溶液对离心转盘雾化喷头喷施后雾滴粒径的影响。选用15种常用冬麦田除草剂，包括乳油（Emulsifiable Concentrate，EC）、悬浮剂（Suspension Concentrate，SC）、可分散油悬浮剂（Oil Dispersion，OD）、水分散粒剂（Water Dispersible Granule，WDG）、悬乳剂（Suspoemulsio，SE）、水剂（Aqueous Solution，AS）和水乳剂（Emulsion in Water，EW）等7种剂型（表1）。除草剂用药量按照商品登记推荐剂量下限（g/hm^{2}或mL/hm^2）配置，浓度参照推荐剂量和植保无人飞机常用的喷洒量（12 L/hm^2）进行配置。

表1 室内雾滴粒径测定试验选用的麦田除草剂

Table 1 Wheat field herbicide selected used in indoor fog droplet size test

	有效成分	有效成分含量	剂型	用药量	厂家
1	唑啉·炔草酯	10%	乳油	750～900 mL/hm^2	安徽众邦生物工程有限公司
2	氯氟吡氧乙酸	200 g/L	乳油	750～1050 mL/hm^2	山东百农思达生物科技有限公司
3	双氟磺草胺	50 g/L	悬浮剂	90～135 mL/hm^2	安徽春辉植物农药厂
4	氯氟吡氧乙酸异辛酯	20%	悬浮剂	750～1050 mL/hm^2	郑州郑氏化工产品有限公司
5	甲基二磺隆	30 g/L	可分散油悬浮剂	300～525 mL/hm^2	拜耳股份公司
6	双氟·氯氟吡	31%	可分散油悬浮剂	450～750 mL/hm^2	江苏省苏州富美实植物保护剂有限公司
7	双氟·氟氯酯	20%	水分散粒剂	75.0～97.5 g/hm^2	科迪华农业科技有限责任公司
8	苯磺隆	75%	水分散粒剂	18～30 g/hm^2	山东华阳农药化工集团有限公司
9	唑草酮	40%	水分散粒剂	60～75 g/hm^2	美国富美实公司
10	2甲·双氟	43%	悬乳剂	900～1500 mL/hm^2	科迪华农业科技有限责任公司
11	炔草酯	15%	微乳剂	375～525 mL/hm^2	安徽美程化工有限公司
12	麦草畏	48%	水剂	300～450 mL/hm^2	上海绿泽生物科技有限责任公司
13	2,4-滴异辛酯	57%	水乳剂	750～1500 mL/hm^2	山东滨农科技有限公司
14	精噁唑禾草灵	69 g/L	水乳剂	750～1500 mL/hm^2	安徽省圣丹生物化工有限公司
15	炔草酯	15%	水乳剂	450~570 mL/hm^2	山东中新科农生物科技有限公司

雾滴粒径的测定装置包括DP-02型激光粒度分析仪（珠海欧美克仪器有限公司）和离心式喷洒系统。离心式喷洒系统包含直流电源、蠕动泵和离心转盘雾化喷头（广州极飞科技有限公司）。

激光粒度分析仪接收端和发射端距离为1.5 m，喷头固定在距离激光粒度仪中心线高0.4 m处，位于激光粒度仪接收端正上方，喷洒雾型呈圆环状，且雾滴圆环垂直沉降后穿过激光束（图1）。离心转盘雾化喷头输入电压20 V，蠕动泵输入电压25 V，喷头转速通过SW-6234C激光转速仪测定，流量K24通过涡轮流量计测定。

2.2 雾滴沉积飘移分布测定

2.2.1 植保无人飞机

植保无人飞机为P30电动四旋翼机（广州极飞科技有限公司，图2），标准起飞质量为38 kg，药箱容量为16 L，尺寸长×宽×高为2018 mm×2013 mm×490 mm，采用18,000 mAh锂电池供

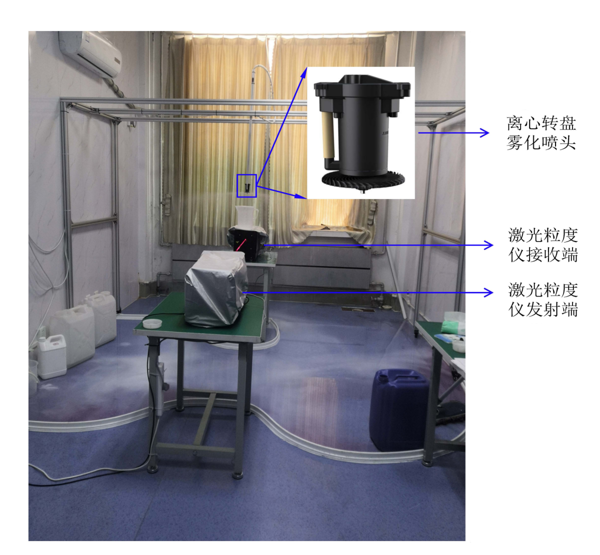


图 1　室内雾滴粒径测定试验

Fig. 1 Indoor droplet size measurement test

电。该植保无人飞机共有4个旋翼和4个离心转盘雾化喷头，喷头位于旋翼正下方，喷嘴间距为1262 mm×1250 mm，喷洒雾滴粒径和作业参数可通过智能手持终端输入，采用载波相位差分（Real-time Kinematic，RTK）技术进行飞行精准定位。试验时植保无人飞机相关指标设置：喷洒雾滴粒径150 μm，喷液量12.0 L/hm^2，喷幅3.5 m，飞行速度5 m/s，飞行高度4 m，飘移试验时仅开启机身后方2个喷嘴。以上作业参数的选择均基于田间除草作业常用参数。



图 2　P30植保无人飞机田间飘移测试场景

Fig.2 Field drift test of P30 unmanned aerial vehicle

2.2.2　雾滴沉积飘移分布采集

试验地位于山东省淄博市朱台镇山东理工大学生态无人农场，试验地四周500 m内无遮挡，小麦高度为（6.1 ± 1.1）cm。由于除草剂多次喷洒会产生小麦药害风险，因此本次试验选择荧光示踪剂+表面活性剂溶液来代替除草剂溶液开展雾滴飘移测定。试验前首先在药箱中添加5.0 g/L的荧光示踪剂罗明丹B（Rhodamine-B，上海萨恩化学技术有限公司），一种水溶性、低毒、低检测限以及高回收率的示踪剂，广泛应用于雾滴飘移试验。为模拟除草剂溶液性质，喷洒溶液中还添加了1‰ OP-10水溶性表面活性剂（山东开普勒生物科技有限公司）。

根据已发表文献，植保无人飞机的飘移距离要显著大于其有效作业喷幅，90%的累积飘移位置在9.0~40.0 m [28-31]，因此临近作业区边缘上风向多个喷幅内都会发在雾滴飘移，而单程喷雾试验难以反映实际的累积飘移量。为此本次试验共测定了三行程的雾滴累积飘移沉积量，植保无人飞机的雾滴采集划分为作业区和飘移区（图3）。

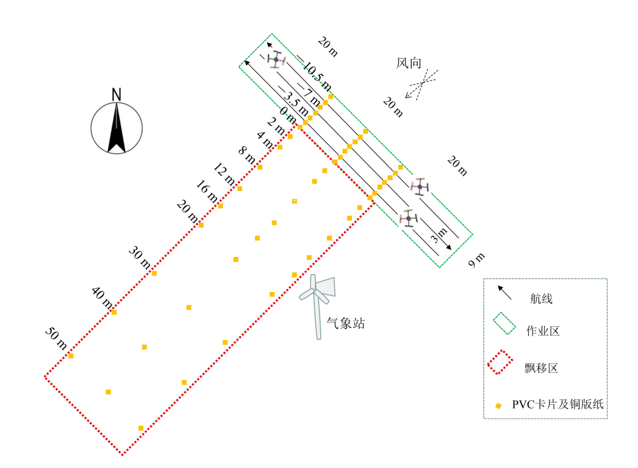
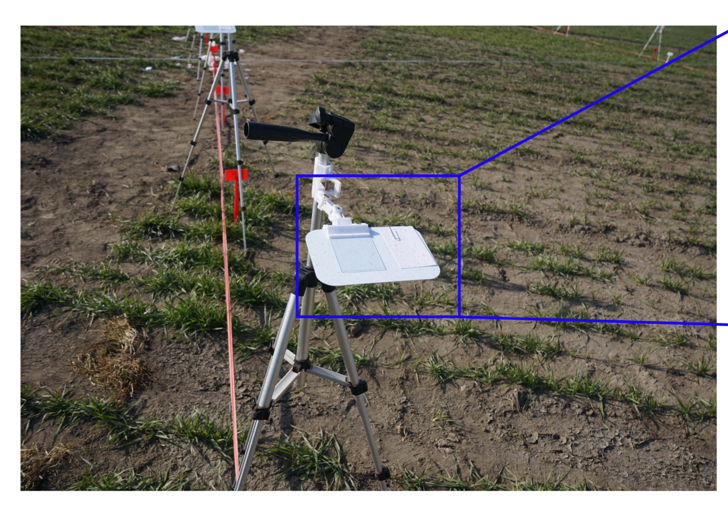


图 3　田间飘移试验采样点布置情况

Fig. 3 Sampling layout in field drift test

作业区指植保无人飞机有效喷幅内的区域，飘移区指在喷雾过程中雾滴受环境风的影响飘移至有效喷幅外的非靶标区域。作业区和飘移区的沉积量（μg/cm^2）通过PVC卡片（4 cm×8 cm）采集，每组PVC卡片的布置方向与风向平行，共16张，其中6张位于作业区，9张位于飘移区，1张位于交界处。每组PVC卡片重复布置3次，相互之间间隔10 m，共48张。作业区的PVC卡片之间的间隔为1.75 m。飘移区的PVC卡片分别距离下风向有效喷幅边缘0、2、4、8、12、16、

20、30、40、50 m。PVC卡片水平固定于硬塑料板上，并通过双头夹布置于三脚架上。为避免受到旋翼气流地面效应的影响，PVC卡片距地面上方垂直距离1 m，植保无人飞机距PVC卡片上方垂直距离3 m。为进一步表征作业区的沉积特征，在作业区PVC卡片放置的塑料板上还布置一张铜版纸（3 cm×8 cm），用于采集雾滴沉积覆盖度和雾滴沉积密度（图4）。



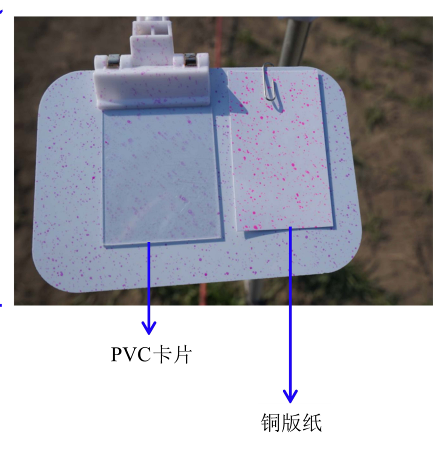


图4　PVC卡片及铜版纸布置模式

Fig. 4　Layout pattern of PVC card and coated paper

2.2.3　雾滴沉积飘移分布测定

田间飘移喷施试验完成后对每个采样点的PVC卡和铜版纸编号后收集到自封袋中。收集过程中切勿污染PVC卡片，带回至实验室后冷藏保存。PVC卡片处理流程和回收率分析参照文献[34]，向存放有PVC卡片的自封袋中加入无水乙醇20 mL洗脱，洗脱完成后取3 mL洗脱液吸取至比色皿中，使用Agilent Cary Eclipse荧光分光光度计（安捷伦科技有限公司）测定荧光值。收集的铜版纸逐一使用HP ScanJet Pro 2500 f1扫描仪（中国惠普有限公司）扫描成分辨率为600 dpi的灰度图像，将扫描后的图像通过DepositScan图像处理软件（美国农业部）进行分析，得到雾滴沉积覆盖度（%）和雾滴沉积密度（雾滴数/cm^2）。

2.2.4　气象参数采集

田间飘移测定试验选择在黄河流域的山东省淄博市进行，但是黄河流域的小麦田冬季临近作物较少，除草飘移风险较低，因此试验时间选择在黄河流域麦田正常除草之前的气温较高时间段，以保证环境温湿度与江淮流域水旱轮作麦区相似。田间飘移试验共开展17组，每组试验气象条件采用Kestrel 5000 LiNK气象站（北京金仕特仪器仪表有限公司）采集，采集频率为2 s/次，采集数据包括环境温度、相对湿度以及风速风向。为避免植保无人飞机旋翼风的干扰，气象站放置于距离有效喷幅边缘下风向20 m处。为保证风向与作业方向夹角在90°±30°，试验时根据风向情况设置相应方向的采样器，其中本次试验共设置3个不同方向的采样，采样线方向分别为55°、115°和350°。

2.3　数据处理

喷头喷雾雾滴粒径通过DV_{10}、DV_{50}、DV_{90}、V<150 μm、RS（Relative Span）指标进行评估，DV_m是指将所有雾滴按照大小排序，占总体积的m %的雾滴体积中径的值，其中DV_{50}又称雾滴体积中径。V<150 μm是指雾滴谱中小于150 μm的雾滴的比例，是评估易飘移小雾滴的重要参数。RS为雾滴分布跨度或雾滴谱宽，是衡量雾滴粒径分布宽度的指标，RS越大，表示雾滴均一性越低，RS计算如公式（1）。

$$RS = \frac{DV_{90} - DV_{10}}{DV_{50}} \quad (1)$$

基于2.2.3小节测定的荧光值，作业区和飘移区的沉积量计算如公式（2）。

$$\beta_{dep} = \frac{(\rho_{smpl} - \rho_{blk}) F_{cal} V_{dil}}{\rho_{spray} A_{col}} \quad (2)$$

其中，β_{dep}为喷雾沉积量，μL/cm^2；ρ_{smpl}为样品的荧光计读数；ρ_{blk}为不含示踪剂的空白采样器荧光计读数；F_{cal}为校准系数，荧光剂单位刻度对应的浓度，μg/L；V_{dil}为用于溶解收集器收集的示踪剂的稀释液的体积，L；ρ_{spray}为喷雾液浓度，g/L；A_{col}为收集器上收集喷雾飘移的投影面积，cm^2。

作业区或飘移区的沉积率计算如公式（3）。

$$\beta_{dep}\% = \frac{10000\beta_{dep}}{\beta_v} \quad (3)$$

其中，β_{dep}为喷雾沉积量，μL/cm^2；β_v为喷施量，L/hm^2。

根据ISO 22866标准[35]，测得喷雾飘移区沉积量沿采样距离x的衰减曲线：

$$f(x)=a+b\ln(x-c) \quad (4)$$

根据飘移曲线计算累积飘移率D_t，%（公式5）和飘移百分比D，%（公式6）：

$$D_t = \int_0^{50} f(x)dx \times 100\% \quad (5)$$

$$D_{\%} = \int_0^{i} f(x_i)dx/D_t \times 100\% \quad (6)$$

90%飘移位置定义为$D_{\%}$等于90%时的采样距离x的值，m；示踪剂回收率R，%（公式7）：

$$R = D_e + D_t \quad (7)$$

飘移比率D_o，%（公式8）：

$$D_0 = D_t/R \times 100\% \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 除草剂溶液对雾滴粒径影响

离心转盘雾化喷头在20 V时转速为9245.5 r/min，蠕动泵在25 V时流量为1.03 L/min。试验测定清水经离心转盘雾化喷头喷洒后的DV_{50}为154.3 μm，V<150 μm为47.2%，RS为1.01。除唑草酮WDG外，其余除草剂溶液经离心转盘雾化喷头喷洒后，DV_{50}均有所降低（表2）。其中甲基二磺隆OD、双氟·氯氟吡OD和氯氟吡氧乙酸EC溶液喷洒后对DV_{50}影响最大，比清水分别降低16.8%、14.0%和22.0%，同时三种溶液喷洒后小雾滴（V<150 μm）增加比例最大，分别增加33.5%、36.4%和50.8%，其他除草剂对V<150 μm增加比例在0.8%～18.0%（表2）。与清水相比，添加各类除草剂后仅苯磺隆WDG和唑草酮WDG溶液经离心转盘雾化喷头喷洒后的RS值有所降低，分别降低7.0%和6.9%，其余药剂对RS值有2.4%～17.9%的增加作用，但影响不显著（表2）。

过去研究表明，溶液性质包括溶液表面张力、粘度、溶液均一性等会与喷头类型、喷雾压力产生交互影响，并显著影响雾滴粒径分布[36,37]。本研究选用的15种药剂中仅有唑草酮WDG溶液增加了离心转盘雾化喷头喷洒的DV_{50}，其余14种药剂中有12种显著降低DV_{50}，并增加了小雾滴（V<150 μm）的比例。其中，可分散性油悬浮剂OD及乳油EC等有机溶剂含量较高的剂型影响最为显著，这会显著增加喷头喷洒后的雾滴飘移风险，在植保无人飞机田间除草剂喷洒中应当注意。

3.2 喷施雾滴在作业区及飘移区沉积飘移分布

3.2.1 气象数据

试验共采集17组飘移数据，选择其中10组风速差异较大的处理进行分析，表3为10组试验时的气象参数，温度在7.3～13.0℃，相对湿度在46.6%～75.0%，各处理温湿度较为稳定、一致，与江淮流域水旱轮作麦区冬小麦除草期代表性温湿度环境基本吻合。侧风风速0.74～3.76 m/s，风向与采样方向夹角绝对值在6.7°～22.3°（小于30°），满足ISO标准[35]要求。

表2　除草剂溶液对雾滴粒径的影响

Table 2　Effect of herbicide solution on droplet size

溶液	DV_{10}/μm	DV_{50}/μm	DV_{90}/μm	V<150μm/%	RS
清水	83.0±5.1	154.3±3.1 a	239.4±14.9	47.2±1.6	1.01±0.11
唑啉·炔草酯EC	76.7±4.3	152.6±3.5 a	245.5±5.7	48.5±2.1	1.11±0.07
氯氟吡氧乙酸EC	62.7±3.5	120.3±4.8 c	194.9±15.9	71.2±5.4	1.10±0.12
双氟磺草胺SC	74.3±1.8	145.2±6.8 b	235.2±11.4	54.8±4.8	1.11±0.15
氯氟吡氧乙酸异辛酯SC	84.7±2.2	152.1±2.1 a	242.6±6.8	49.7±1.3	1.04±0.06
甲基二磺隆OD	64.4±0.6	128.4±3.9 c	214.3±5.4	63.0±2.6	1.17±0.09
双氟·氯氟吡OD	63.9±2.6	132.7±4.8 c	218.5±4.0	64.4±3.3	1.17±0.07
双氟·氟氯酯WDG	77.9±1.3	145.4±1.3 b	229.7±22.3	53.6±2.5	1.04±0.08
苯磺隆WDG	86.8±2.4	154.2±4.1 a	232.2±5.5	47.6±2.7	0.94±0.06
唑草酮WDG	87.1±2.5	156.2±3.4 a	234.5±1.7	47.9±3.5	0.94±0.04
2甲·双氟SE	76.8±3.6	147.3±3.6 b	251.4±21.3	54.6±2.9	1.19±0.15
炔草酯ME	71.9±3.5	142.1±7.3 b	234.3±10.3	55.2±5.4	1.14±0.09
2甲4氯钠AS	71.6±2.5	142.4±6.4 b	233.9±12.6	55.6±5.2	1.14±0.04
2,4-滴异辛酯EW	70.6±2.5	140.3±4.9 b	231.6±10.5	55.7±5.1	1.15±0.05
精噁唑禾草灵EW	71.8±2.3	144.1±4.9 b	232.8±12.6	55.6±3.7	1.12±0.05
炔草酯EW	78.2±2.3	145.8±3.1 b	252.4±14.4	54.2±2.4	1.19±0.15

注：表中同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

表3　田间飘移试验气象参数

Table 3　Meteorological parameters in field drift test

处理架次	温度/℃	相对湿度/%	侧风风速/($m \cdot s^{-1}$)	风向/(°)	采样线角度/(°)	风向偏差角绝对值/(°)
1	9.7(0.01)	57.6(0.11)	0.74(0.03)	101.4(1.1)	115	13.6
2	7.3(0.02)	57.6(0.07)	1.11(0.09)	92.7(0.7)	115	22.3
3	8.6(0.02)	52.0(0.09)	1.24(0.06)	70.4(1.4)	55	15.4
4	9.0(0.01)	64.4(0.14)	1.75(0.04)	108.3(2.1)	115	6.7
5	10.0(0.01)	75.0(0.04)	2.53(0.03)	360.4(2.2)	350	10.4
6	7.7(0.03)	46.6(0.07)	2.67(0.02)	125.8(1.4)	115	10.8
7	11.3(0.07)	64.2(0.09)	2.74(0.04)	69.3(1.1)	55	14.3
8	11.5(0.01)	56.9(0.12)	2.93(0.11)	124.5(1.0)	115	9.5
9	12.0(0.02)	66.9(0.04)	3.35(0.13)	335.1(1.4)	350	14.9
10	13.0(0.03)	48.2(0.03)	3.76(0.43)	329.6(1.0)	350	20.4

注：表中数据为平均值（标准误），环境参数每隔2 s记录一次；
采样线设置方向：55°、115°和350°

3.2.2　作业区雾滴沉积覆盖度及雾滴沉积密度

侧风风速的增加会降低作业区的雾滴沉积覆盖度和沉积密度（表4）。侧风风速在0.74～3.76 m/s范围内，雾滴沉积覆盖度为1.62%～3.93%，雾滴沉积密度为8.24～19.52个/cm^2，当侧风风速为3.76 m/s时，作业区的雾滴沉积覆盖度和雾滴沉积密度仅为侧风风速0.74 m/s时的41.3%和42.2%（表4）。侧风风速的增加还会降低作业区的雾滴沉积均匀性，不同试验风速下的雾滴沉积覆盖度和雾滴沉积密度变异系数分别为35.0%～92.1%和31.5%～81.4%，其中侧风风速大于3.0 m/s的处理，作业区的沉积变异系数均大于80.0%（表4）。

基于雾滴“杀伤半径”理论，作业区雾滴沉积覆盖度、雾滴密度以及沉积均匀性的降低会降低植保无人飞机喷洒对病虫草害的防治效果[38]。过去研究表明，喷洒均匀性一直是植保无人飞机存在的问题，其中包括旋翼风场及喷头安装位置

表4 作业区雾滴沉积覆盖度及雾滴沉积密度

Table 4 Coverage ratio and density of droplets depositon in in-swath zone

试验风速/(m·s^{-1})	雾滴沉积覆盖度/%		雾滴沉积密度/(雾滴数·cm^{-2})	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数
0.74(0.03)	3.93	35.0	19.52	31.5
1.11(0.09)	3.56	32.1	17.63	53.1
1.24(0.06)	3.16	40.2	16.68	55.6
1.75(0.04)	3.32	47.9	17.41	51.4
2.53(0.03)	2.76	51.6	14.58	60.3
2.67(0.02)	2.72	78.0	13.07	50.9
2.74(0.04)	2.78	65.5	13.47	54.5
2.93(0.11)	2.68	78.2	13.52	73.4
3.35(0.13)	2.33	92.1	12.50	80.8
3.76(0.43)	1.62	89.0	8.24	81.4

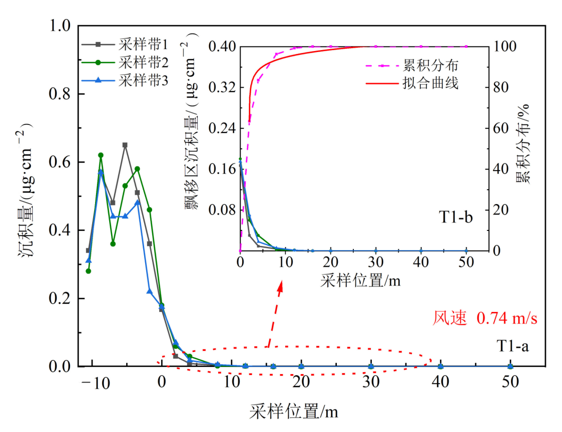
等因素的影响[19,20]。本试验结果表明，在外在侧风的影响下，均匀性会进一步降低，这对于病虫草害的防效会产生显著影响，因此植保无人飞机喷洒施药应尽量选择低风速下进行。

3.2.3 作业区及飘移区雾滴沉积量分布

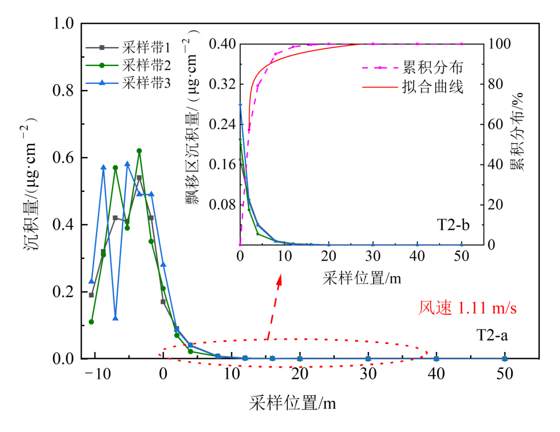
不同侧风风速下雾滴体积中径为150 μm的雾滴在作业区和飘移区的沉积量分布参见图5中T1（a）—T10（a），飘移区沉积量随采样位置的累积分布参见图5中T1（b）—T10（b）。通过荧光分光光度计测定罗丹明B荧光值，并根据建立的浓度与荧光值之间的标准曲线，确定罗丹明B最低检测限为0.0002 μL/cm^2。在示踪剂喷施量为60 g/hm^2（0.6 μg/cm^2）的情况下，有效喷幅内的雾滴沉积量为0.00～0.77 μg/cm^2（图5）。受侧风影响，所有处理作业区在−10 m位置沉积量最低。不同侧风风速下作业区的雾滴沉积量变异系数为36.9%～92.2%，沉积的均匀性受侧风风速增加而降低。

不同风速下雾滴在飘移区的变化规律基本一致，除T7、T8和T9三个处理在下风向2 m处比0 m处有所增加以外，其他位置沉积量随着飘移距离的增加逐渐降低。在下风向12 m的位置处，沉积量范围值在0.00～0.04 μg/cm^2（低于检测限～喷施量的6.6%），尽管在下风向12 m处沉积量已很低，但是仍存在雾滴飘移，且此飘移量是否会对敏感作物产生药害影响还需要进一步论证。所有处理在50 m位置的沉积量都低于检测限。值得注意的是，在风速较低情况下（0.74 m/s），雾滴在4 m处沉积量仍有0.01～0.03 μg/cm^2（喷液量的1.5%～5.0%），这主要是由于受到侧风、旋翼风场以及雾滴布朗运动等多因素影响产生的雾滴飘移。

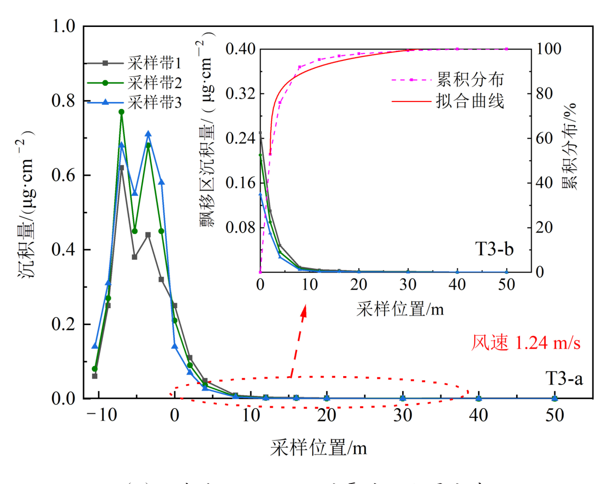
作者团队[29]在新疆石河子（高温、干燥环境）测定极飞P20植保无人飞机的雾滴飘移，发现当侧风风速达到3.5 m/s时，下风向12 m处沉积量约是作业区的10%，下风向50 m处仍存在飘移雾滴，此结果比本研究的飘移距离更远、飘移量更大，这也证明了环境参数对飘移的显著影响。在飘移距离方面，王娟等[39]测定单旋翼无人机在槟榔上的喷施飘移时发现，雾滴飘移最远距离可达36.4 m，这跟本研究的测定结果基本类似。



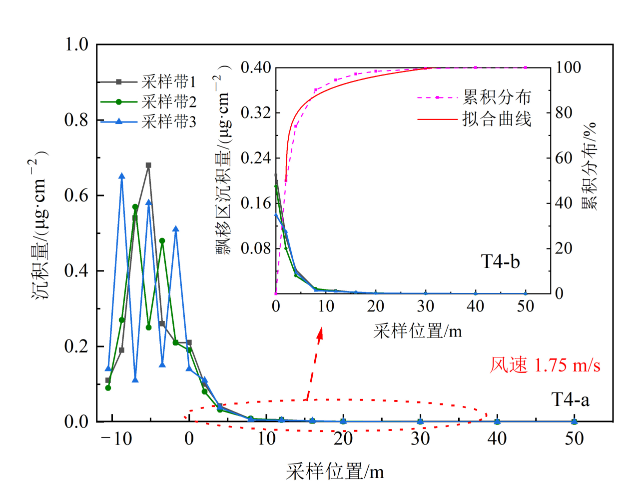
(a)风速为0.74 m/s下的雾滴沉积量分布



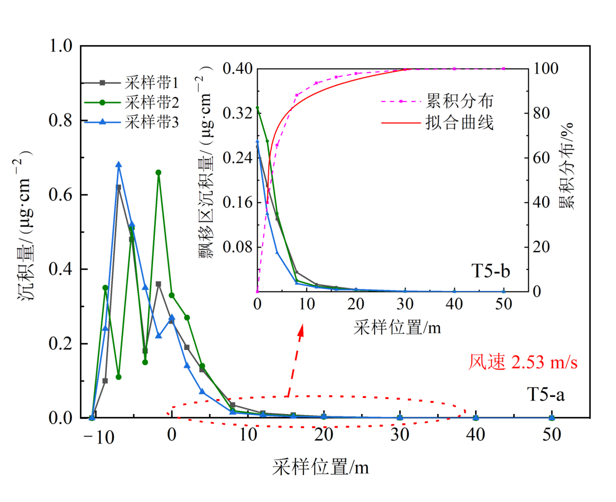
(b)风速为1.11 m/s下的雾滴沉积量分布



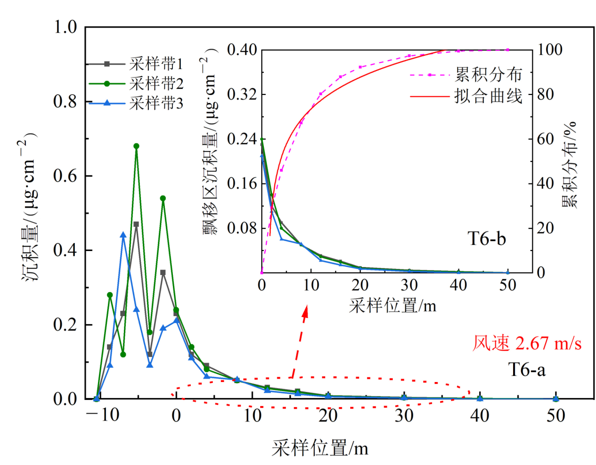
(c)风速为 1.24 m/s 下的雾滴沉积量分布



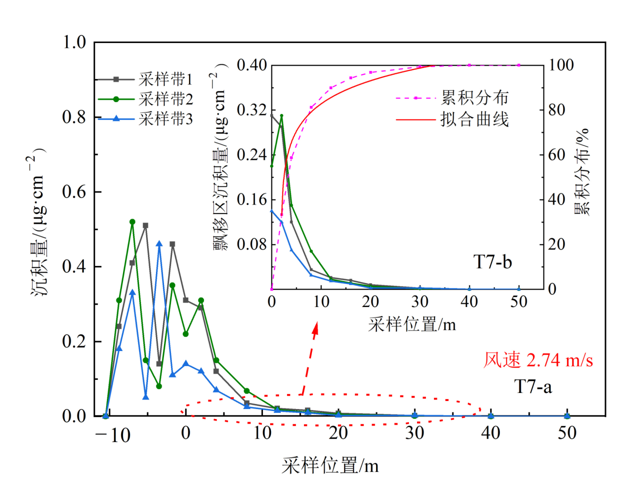
(d)风速为 1.75 m/s 下的雾滴沉积量分布



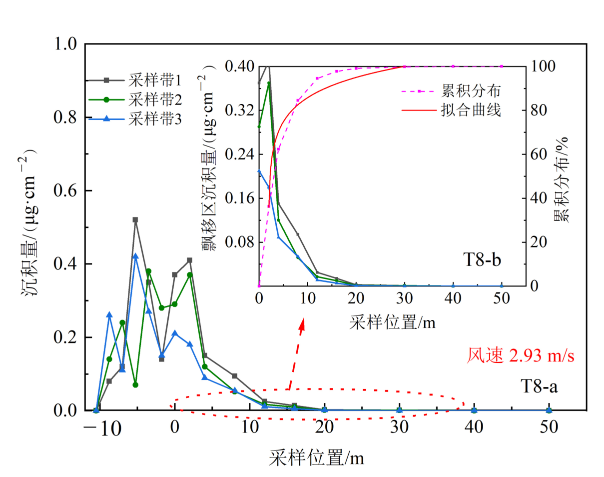
(e)风速为 2.53 m/s 下的雾滴沉积量分布



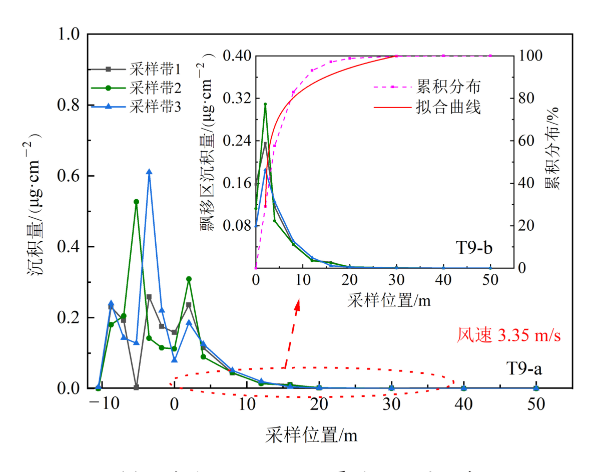
(f)风速为 2.67 m/s 下的雾滴沉积量分布



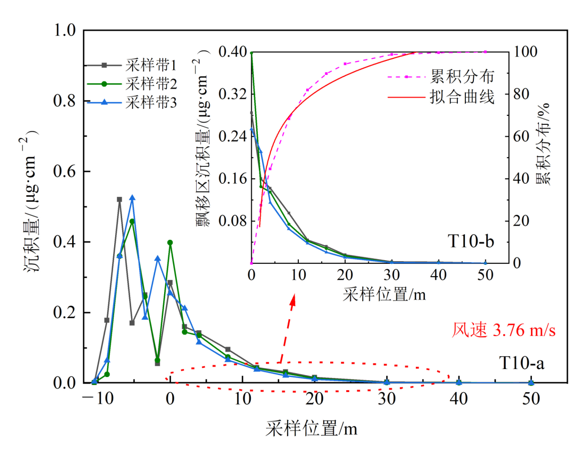
(g)风速为 2.74 m/s 下的雾滴沉积量分布



(h)风速为 2.93 m/s 下的雾滴沉积量分布



(i)风速为3.35 m/s下的雾滴沉积量分布



(j)风速为3.76 m/s下的雾滴沉积量分布

注：采样位置是指距离有效喷幅下风向边缘的距离，试验时设定的喷施雾滴粒径为150 μm

图5 不同环境风速下植保无人飞机喷施雾滴沉积量分布

Fig. 5 Distribution of droplets with UAV spraying under different wind conditions

对作业区和飘移区的沉积量进行质量平衡分析，计算得到示踪剂的回收率在54.2%~75.9%(表5)。本试验示踪剂的回收率相对较低，主要是由于罗丹明B容易发生光解[40]，且部分示踪剂在旋翼风场的卷扬下沉积到植保无人飞机机体等因素导致。

表5 田间飘移试验雾滴沉积飘移分布及质量平衡结果

Table 5 Drift distribution and mass balance results in field drift test

处理	风速/(m·s^{-1})	作业区沉积率/%	飘移区飘移率/%	回收率/%	飘移比率/%	90%累积飘移位置
T1	0.74(0.03)	69.3(4.65)	6.6(0.3)	75.9	8.7	4.8
T2	1.11(0.09)	61.8(2.9)	9.8(0.2)	71.6	13.6	6.6
T3	1.24(0.06)	66.2(8.0)	10.2(1.2)	76.3	13.3	9.2
T4	1.75(0.04)	51.9(2.2)	10.3(0.6)	62.2	16.5	10.2
T5	2.53(0.03)	50.7(2.7)	22.6(1.1)	73.3	30.8	12.9
T6	2.67(0.02)	38.7(7.7)	22.2(0.4)	60.5	36.6	22.4
T7	2.74(0.04)	39.4(7.8)	25.7(2.6)	65.2	39.5	16.1
T8	2.93(0.11)	34.9(1.9)	31.2(4.9)	66.1	47.2	13.6
T9	3.35(0.13)	31.3(5.4)	22.9(3.8)	54.2	42.2	14.9
T10	3.76(0.43)	37.7(2.8)	32.6(5.1)	70.3	46.4	21.3

注：表中数据均为平均值（标准误），作业区以及飘移区的结果来源于3次重复，试验时喷洒雾滴粒径设置为150 μm

通过计算飘移比率发现，飘移比率随风速的增加而增加，当侧风风速达到3.76 m/s时，雾滴飘移比率达到46.4%，即有接近一半的雾滴由作业区飘移至飘移区（表5）。在不同侧风风速下，90%的累积飘移位置在4.8~22.4 m。90%累积飘移位置是评估飘移量的重要参数，研究者在小麦田测定油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性研究中发现，在侧风风速在0.76~5.5 m/s时，90%飘移位置在喷雾区域下风向水平距离9.3~14.5 m的范围内[41]，在凤梨田喷施飘移测定中，发现在侧风风速1.17~3.93 m/s时，90%飘移位置在3.7~46.5 m的范围内[30]。以上两结果与本试验有一定差异，这也主要受到试验机型、环境参数情况、喷头类型等多因素的影响。

在本研究中，当风速达到2 m/s以上时，90%累积飘移位置与侧风风速并未呈现较好的线性相关性，这主要是因为90%累积飘移位置是通过累积分布曲线拟合计算后得来，而拟合曲线受下风向临近有效喷幅边缘处的沉积量影响较大，在风速2 m/s以上时，下风向临近有效喷幅边缘

处的沉积量波动较大（图5），导致拟合曲线的稳定性降低，计算取得的90%累积飘移位置波动较大。

3.2.4 飘移区下风向雾滴飘移曲线

通过对10组数据各采样点位置处的沉积量与采样位置、侧风风速进行非线性拟合，获取下风向雾滴飘移拟合方程如公式（9）：

$$D_p = \exp(-D_t/4.71)\times(0.053W_s+0.104) \qquad (9)$$

其中，D_p为飘移区雾滴沉积量，μg/cm²；D_t为下风向有效喷幅边缘距离，m；W_s为侧风风速，m/s。表6为描述统计量以及方差分析表，拟合决定系数$R^2=0.87$，表明拟合效果较好。从拟合方程可知，下风向沉积量与侧风风速符合正相关线性函数关系，这一结果与飘移比率的结论基本吻合。

表6 雾滴飘移拟合方程的描述性统计量及方差分析表

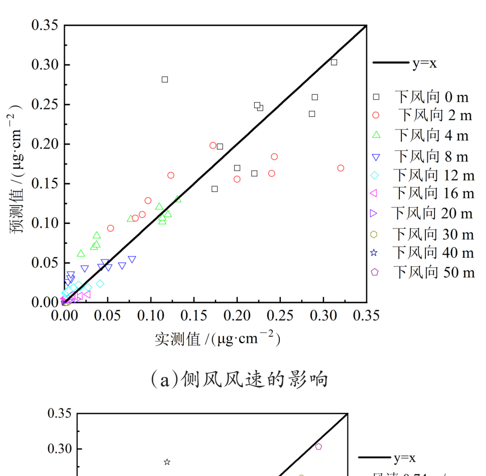
Table 6 Descriptive statistics and variance analysis of the droplets drift fitting equation

变异来源	自由度	平方和	平均值	F值	$p>F$
回归项	3	0.873	0.29	313.9	1.6×10^{-5}
残差项	97	0.090	9.3×10^{-4}	——	——
未修正的总误差平方和	100	0.963	——	——	——
修正的总误差平方和	99	0.687	——	——	——

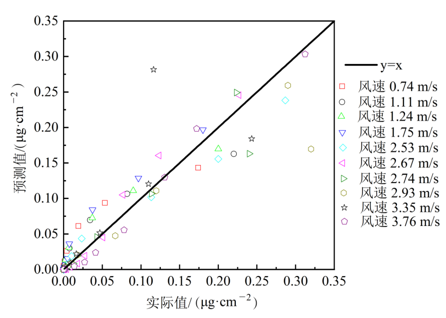
雾滴飘移测定值与预测值对比结果见图6。分析不同的采样位置对拟合结果的影响发现（图6（a）），位于作业区和飘移区交界处，即下风向0 m和2 m位置的预测值与实际值偏差较大，此位置飘移雾滴受旋翼风场的影响，导致雾滴沉积波动较大，这也是导致3.2.3中拟合计算的90%累积飘移位置波动较大的原因。分析不同侧风风速对拟合结果的影响（图6（b）），除风速在2.93和3.35 m/s下的个别沉积值偏差较大外，其余沉积实际值与预测值拟合度较高。

4 结论与展望

为分析冬小麦除草时期，植保无人飞机喷洒除草剂雾滴飘移风险，本研究通过在室内测定冬麦除草剂溶液对离心转盘雾化喷头喷洒雾滴粒径的影响，在田间试验测定植保无人飞机喷洒雾滴飘移分布，获得主要结论如下。



（a）侧风风速的影响



（b）下风向采样位置的影响

图6 飘移预测值与实际测定值对比

Fig. 6 Comparison of measured drift and modeled drift

（1）高浓度除草剂溶液对雾滴粒径分布具有显著影响，绝大多数药剂溶液经离心转盘雾化喷头喷洒后，DV_{50}显著降低、V<150 μm和RS显著增加，尤其是含有机溶剂较多的剂型。

（2）侧风风速的增加会显著降低作业区的雾滴沉积覆盖度、沉积密度和沉积均匀性，高风速下的沉积覆盖度、沉积密度（3.76 m/s）仅为低风速（0.74 m/s）下的50%左右。

（3）试验雾滴粒径在150 μm、风速在0.74～3.76 m/s情况下，飘移区下风向12 m处雾滴沉积量为作业区的10%以下，50 m处飘移量低于检测限。雾滴飘移比率随风速的增加而增加，当风速达到3.76 m/s时，飘移比率达到46.4%。不同风速下，90%的累积飘移位置在4.8～22.4 m，因此在较高风速条件作业时需要预留25 m以上的飘移缓冲区。

上述结果可以为植保无人飞机冬小麦田不同风速作业下的雾滴飘移距离提供数据支持。然而

该结果受试验条件和机型限制，仅适用于冬小麦田作业的P30植保无人飞机（极飞公司）。目前植保无人飞机喷施技术发展时间较短，尚缺少大量的飘移数据以建立全面的喷雾飘移模型，在未来的研究中通过积累数据，建立完整的雾滴飘移模型对于提高植保无人飞机施药技术具有重要意义。

参考文献：

[1] 中华人民共和国农业农村部. 我国三大粮食作物化肥农药利用率双双超40%[EB/OL]. [2021-01-19]. http://www. moa. gov. cn/xw/bmdt/202101/t20210119_6360102.htm.

[2] LAN Y, CHEN S, BRADLEY K F. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 1-17.

[3] 何勇, 肖舒裴, 方慧, 等. 植保无人机施药喷嘴的发展现状及其施药决策[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (13): 113-124.
HE Y, XIAO S, FANG H, et al. Development situation and spraying decision of spray nozzle for plant protection UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 113-124.

[4] 袁会珠, 郭永旺, 薛新宇, 等. 植保无人机的推广应用对于提高我国农药利用率的作用[J]. 农业工程技术, 2018 (9): 46-50.
YUAN H, GUO Y, XUE X, et al. Effect of popularization and application of plant protection UAV on improving pesticide utilization rate in China[J]. Agricultural Engineering Technology, 2018 (9): 46-50.

[5] 兰玉彬, 王国宾. 中国植保无人机的行业发展概况和发展前景[J]. 农业工程技术, 2018 (9): 17-27.
LAN Y, WANG G. Overview and prospect of China's plant protection UAV industry development[J]. Agricultural Engineering Technology, 2018 (9): 17-27.

[6] 程忠义. 植保无人机行业年度发展报告[R]. 深圳: 慧飞无人机应用技术培训中心, 2019.
CHENG Z. Annual development report of plant protection UAV industry [R]. Shenzhen: Huifei Unmanned Aerial Systems Training Center, 2019.

[7] 文晟, 兰玉彬, 张建桃, 等. 农用无人机超低容量旋流喷嘴的雾化特性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 85-93.
WEN S, LAN Y, ZHANG J, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics of ultra-low-volume swirl nozzle for agricultural unmanned aviation vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 85-93.

[8] ZHOU Q, XUE X, QIN W, et al. Optimization and test for structural parameters of UAV spraying rotary cup atomizer[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 78-86.

[9] 茹煜, 金兰, 贾志成, 等. 无人机静电喷雾系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 42-47.
RU Y, JIN L, JIA Z, et al. Design and experiment on electrostatic spraying system for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 42-47.

[10] 朱航, 李宏泽, 黄钰, 等. 施药技术参数对旋翼植保无人机喷雾特性的影响[J]. 智慧农业, 2019, 1(3): 113-122.
ZHU H, LI H, HUANG Y, et al. Effects of technical operation parameters on spray characteristics of rotor plant protection UAV[J]. Smart Agriculture, 2019, 1 (3): 113-122.

[11] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17):40-46.
CHEN S, LAN Y, LI J, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 40-46.

[12] 蒙艳华, 兰玉彬, 李继宇, 等. 单旋翼油动植保无人机防治小麦蚜虫参数优选[J]. 中国植保导刊, 2017, 37 (12): 66-71.
MENG Y, LAN Y, LI J, et al. Optimization of operation parameters of single-rotor gas-powered UAV for controlling wheat aphid[J]. China Plant Protection, 2017, 37(12): 66-71.

[13] 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 50-56.
QIN W, XUE X, ZHOU L, et al. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 50-56.

[14] LI X, GILES D K, NIEDERHOLZER F J, et al. Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection[J]. Pest Management Science, 2021, 77(1): 527-537.

[15] PAN Z, KEJIAN W, QIANG L, et al. Droplet distribution and control against citrus leafminer with UAV spraying[J]. International Journal of Robotics and Automation, 2017, 32(3): 299-307.

[16] MARTIN D E, WOLDT W E, LATHEEF M A. Effect

of application height and ground speed on spray pattern and droplet spectra from remotely piloted aerial application systems[J]. Drones, 2019, 3(4): ID 83.
[17] RICHARDSON B, ROLANDO C A, SOMCHIT C, et al. Swath pattern analysis from a multi-rotor unmanned aerial vehicle configured for pesticide application[J]. Pest Management Science, 2020, 76(4): 1282-1290.
[18] WANG G, LI X, ANDALORO J, et al. Deposition and biological efficacy of UAV-based low-volume application in rice fields[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2020, 3(2): 65-72.
[19] WANG G, LAN Y, QI H, et al. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: Effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat[J]. Pest Management Science, 2019, 75(6): 1546-1555.
[20] WANG G, LAN Y, YUAN H, et al. Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): ID 218.
[21] XIN F, ZHAO J, ZHOU Y, WANG G, et al. Effects of dosage and spraying volume on cotton defoliants efficacy: A case study based on application of unmanned aerial vehicles[J]. Agronomy, 2018, 8(6): ID 85.
[22] CHEN P, OUYANG F, WANG G, et al. Droplet distributions in cotton harvest aid applications vary with the interactions among the unmanned aerial vehicle spraying parameters[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 163: ID 113324.
[23] 191农资人. 睿纳新®植保无人机施药操作规范发布, 富美实整装启航[EB/OL]. (2018-09-08)[2021-06-20]. https://www.sohu.com/a/252733299_182429.
[24] 中国裁判文书网. 植保无人飞机玉米田喷施除草剂雾滴飘移引起大豆田严重药害[EB/OL]. (2020-10-10)[2021-06-20]. https://wenshu. court. gov. cn/website/wenshu/181107ANFZ0BXSK4/index. html? docId=bbdaa2729a0c408cb01dac500032e210.
[25] 中国裁判文书网. 植保无人飞机小麦田喷施除草剂雾滴飘移引起白菜田严重药害[EB/OL]. (2020-07-27)[2021-06-20]. https://wenshu. court. gov. cn/website/wenshu/181107ANFZ0BXSK4/index. html? docId=b17754c3fd88491ab83eac03012464cb.
[26] WEN S, SHEN N, ZHANG J, et al. Single-rotor UAV flow field simulation using generative adversarial networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: ID 105004.
[27] WEN S, HAN J, NING Z, et al. Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quad-rotor drone wake at different flight speeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: ID 105036.
[28] 鲁文霞, 兰玉彬, 王国宾, 等. 环境风速对四旋翼植保无人机喷施雾滴飘移的影响研究[J]. 农机化研究, 2021,43(7): 187-193.
LU W, LAN Y, WANG G, et al. Study on the influence of wind speed on the drift of four-rotor plant protection UAV[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(7): 187-193.
[29] WANG G, HAN Y, Li X, et al. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer[J]. Science of the Total Environment, 2020, 737: ID 139793.
[30] WANG J, LAN Y, ZHANG H, et al. Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 5-12.
[31] XUE X, KANG T, QIN W, et al. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(4): 23-28.
[32] WANG Z, LAN L, HE X, et al. Dynamic evaporation of droplet with adjuvants under different environment conditions[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 1-6.
[33] HUNTER J E, GANNON T W, RICHARDSON R J, et al. Coverage and drift potential associated with nozzle and speed selection for herbicide applications using an unmanned aerial sprayer[J]. Weed Technology, 2020, 34(2): 235-240.
[34] FRITZ B, HOFFMANN W, BAGLEY W, et al. Field scale evaluation of spray drift reduction technologies from ground and aerial application systems[J]. Journal of ASTM International, 2011, 8(5): ID 103457.
[35] International Organization for Standardization. Equipment for Crop Protection-Methods for Field Measurement of Spray Drift: ISO 22866[S]. Geneva: ISO copyright office, 2005
[36] HILZ E, VERMEER A W P. Spray drift review: The extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. Crop Protection, 2013, 44: 75-83.
[37] SPANOGHE P, DE S M, VAN D M P, et al. Influence of agricultural adjuvants on droplet spectra[J]. Pest Management Science: Formerly Pesticide Science, 2007, 63(1): 4-16.
[38] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效

果的关系[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 9-16.
YUAN H, WANG G. Effect of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J]. Plant Protection, 2015, 41(6): 9-16.
[39] 王娟, 兰玉彬, 姚伟祥,等. 单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 109-119.
WANG J, LAN Y, YAO W, et al. Effects of working height of single-rotor unmanned aerial vehicle on drift and droplets deposition distribution of areca tree[J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(7): 109-119.
[40] 袁雪, 王俊, 周舟,等. 喷雾荧光示踪剂回收率影响因素实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 54-57, 85.
YUAN X, WANG J, ZHOU Z, et al. Analysis on the recovery rate of spraying of fluorescent tracers[J]. Transactions of the CSAM, 2010, 41(10): 54-57, 85.
[41] 王潇楠, 何雄奎, 王昌陵, 等. 油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 117-123.
WANG X, HE X, WANG C, et al. Spray drift characteristics of fuel powered single-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 117-123.

Evaluation of Droplet Size and Drift Distribution of Herbicide Sprayed by Plant Protection Unmanned Aerial Vehicle in Winter Wheat Field

WANG Guobin[1,2], HAN Xin[1,2], SONG Cancan[1,2], YI Lili[1,2], LU Wenxia[1,2], LAN Yubin[1,2,3*]

(1. *College of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*; 2. *Shandong Provincial Engineering Technology Research Center for Agricultural Aviation Intelligent Equipment*, *Zibo* 255049, *China*; 3. *College of Electronics Engineering*/*College of Artificial Intelligence*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: With the continuous increase of the spraying area, the problem of droplet drift risk in the spraying process of UAV is becoming increasingly prominent, especially the herbicide drift. In order to clarify the effect of the herbicide solution on the droplet size and the deposition and drift distribution characteristics sprayed by UAVs, the droplet sizes of 15 herbicide solutions sprayed by the centrifugal rotary atomizer nozzle installed in the plant protection UAV were measured in the laboratory, and the distribution of droplet deposition and drift in the spraying area and drift area were measured by adding a fluorescent tracer (60 g/hm^2) to the tank in the field. The results showed that the herbicide solution had a significant effect on the droplet size distribution. The DV_{50} of all the other solutions was reduced after sprayed by the centrifugal atomizer except the Carfentrazone-ethyl water dispersible granule, and the maximum decrease ratio was 22.0%. The proportion of small droplets (V<150 μm) increased, with the maximum value of 50.8%. When the environmental crosswind speed was 3.76 m/s, the coverage and number of droplets in the spraying area were only 41.3% and 42.2% of that at 0.74 m/s, and the deposition uniformity was significantly reduced. In the drift zone, the deposition amount of droplets was under 10% of in-swath zone at the downwind of 12 m, and the deposition of all the treatments at 50 m was lower than detection limits (0.0002 μL/cm^2). The drift ratio increased with the wind speed increased. When the crosswind speed reached 3.76 m/s, the drift ratio of droplets was 46.4%. Under different crosswind, 90% of the total measured spray drift were 4.8–22.4 m. By fitting the deposition in the drift zone with drift distance and crosswind speed, the downwind deposition was proportional to the crosswind speed. This study provides data support for droplet drift distance of plant protection UAV spraying in wheat fields at different wind speeds in winter and provides a basis for spray drift buffer zone, drift risk assessment, and relevant standard formulation.

Key words: plant protection unmanned aerial vehicle (UAV); wheat; herbicide formulation; droplet size; crosswind speed; droplets deposition and drift